

CALIBRAÇÃO DE SENSORES PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE EM QUATRO CLASSES DE SOLO

IGOR ALEXANDRE DE SOUZA¹; HENRIQUE LOPES COIMBRA¹; WESLEY ESDRAS SANTIAGO¹, RAFAEL FARIA CALDEIRA¹; DANIEL MAI¹ E DANIEL CAMPANELLI DE ANDRADE¹

*¹Instituto de Ciências Agrárias – ICA, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Avenida Universitária, 1000, Universitários, 38610-036, Unaí, MG Brasil
igor.alexandre@ufvjm.edu.br; henrique.lopes@ufvjm.edu.br; wesley.santiago@ufvjm.edu.br;
rafael.faria@ufvjm.edu.br; daniel.mai@ufvjm.edu.br; daniel.campanelli@icrop.com.br*

1 RESUMO

Os sensores de umidade do solo são uma ferramenta útil para otimizar o uso da água, mas devem ser calibrados localmente para garantir precisão. Isso envolve considerar a sensibilidade desses sensores aos atributos naturais do solo, que variam de acordo com sua classe e particularidades. O objetivo desse estudo foi avaliar e calibrar três sensores de umidade do solo (HidroFarm, Vergtrug Care e PMS710) em quatro diferentes classes de solo: Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Amarelo Distrófico, Nitossolo Vermelho Distrófico e Cambissolo Háplico. Foram utilizadas 12 amostras de solo indeformadas coletadas em colunas de PVC de 112 mm de diâmetro por 200 mm de altura. As amostras foram saturadas com água destilada, e os sensores foram inseridos imediatamente após a saturação. Em razão das características específicas de cada sensor e tipo de solo, foram desenvolvidas curvas de calibração personalizadas. A avaliação das curvas de calibração, considerando o coeficiente de determinação Kendall e Pearson e os valores de p , revelou que os sensores Vergtrug Care e PMS710 demonstraram resultados estatisticamente significativos e são, portanto, recomendados para a estimativa de umidade volumétrica nos solos estudados.

Keywords: curvas de calibração, eficiência de sensores, propriedades físicas do solo, umidade volumétrica.

SOUZA, I. A. de; COIMBRA, H. L.; SANTIAGO, W. E., CALDEIRA, R. F.; MAI, D. e ANDRADE, D. C. de
SENSOR CALIBRATION FOR MOISTURE ESTIMATION IN FOUR SOIL CLASSES

2 ABSTRACT

Soil moisture sensors are useful tools for optimizing water use but need to be calibrated locally to ensure accuracy. This involves considering the sensitivity of these sensors to natural soil attributes, which vary according to their class and characteristics. The aim of this study was to evaluate and calibrate three soil moisture sensors (HidroFarm, Vergtrug Care and PMS710) in four different soil classes: dystrophic Red Latosol, dystrophic Yellow Latosol, dystrophic Red Nitosol and a Haplic Cambisol. Twelve undisturbed soil samples were collected from PVC

columns with a diameter of 112 mm and a height of 200 mm. The samples were saturated with distilled water, and the sensors were inserted immediately after saturation. Owing to the specific characteristics of each sensor and soil type, customized calibration curves were developed. The evaluation of these curves, which is based on the criteria of the coefficient of determination, Kendall's coefficient, Pearson's coefficient, p value and mean squared error, demonstrated that only the Vergrug Care and PMS710 sensors are recommended for estimation of volumetric moisture in the studied soils.

Keywords: calibration curves, moisture content, sensor efficiency, soil properties.

3 INTRODUÇÃO

A umidade do solo desempenha um papel crucial em quase todos os processos terrestres, com impactos significativos no ciclo hidrológico e nas atividades humanas (Ro Timi Ojo; Bullock; Fitzmaurice, 2015). A manutenção de níveis adequados de umidade é essencial para a produtividade das culturas e para o desenvolvimento saudável das plantas (Krueger; Ochsner; Quiring, 2019). O monitoramento da umidade do solo fornece informações vitais sobre a disponibilidade de água, a saúde do solo e sua capacidade de retenção hídrica; indicadores chave para a sustentabilidade dos sistemas agropecuários (Kashyap; Kumar, 2021).

Diversos dispositivos de monitoramento da umidade do solo, que medem a variabilidade temporal em intervalos curtos, são utilizados em agricultura de precisão, monitoramento de paisagens e mapeamento global a longo prazo. Embora métodos tradicionais, como o gravimétrico e a tensiometria, sejam amplamente reconhecidos (Majhi; Sarkar, 2019; Singh *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2018), os desafios associados à coleta e processamento de amostras e o avanço tecnológico têm impulsionado o desenvolvimento de sensores eletrônicos modernos. Estes sensores oferecem a capacidade de medir, registrar e transmitir remotamente, de forma instantânea, a umidade do solo (Cássaro *et al.*, 2019; Santos Neto *et al.*, 2020).

Embora precisos, os sensores eletrônicos de umidade do solo, requerem calibração em campo para garantir que os valores medidos reflitam com precisão a umidade real (Sena *et al.*, 2020). A distribuição heterogênea dos tipos de solo nas áreas agrícolas (Santos Neto *et al.*, 2020), exige o desenvolvimento de curvas de calibração específicas para cada tipo de solo, assegurando a utilização adequada dos sensores.

A calibração de sensores em diferentes classes de solo é crucial, uma vez que as características físicas e químicas dos solos influenciam diretamente a precisão das medições. Solos como Argissolos, Latossolos e Nitossolos, com texturas e composições distintas, apresentam comportamentos variados em relação à retenção de água, tornando a calibração específica essencial (Pizetta *et al.*, 2017). Solos arenosos, como Neossolos Quartzarênicos e Cambissolos, podem exigir ajustes diferenciados para garantir a acurácia dos sensores (Miranda *et al.*, 2007). A calibração permite um monitoramento eficiente da umidade e otimiza a gestão hídrica, fundamental para a sustentabilidade agrícola.

As diferenças entre solos temperados e tropicais, como Latossolos e Nitossolos, influenciam diretamente a medição da umidade, tornando as funções de pedotransferência desenvolvidas para solos temperados inadequadas para solos tropicais. A estrutura microagregada dos solos tropicais, com óxidos de ferro e

alumínio, afeta a retenção de água e a resposta dos sensores. Portanto, a calibração específica para cada classe de solo é fundamental para obter medições de umidade mais confiáveis (Tomasella; Hodnett, 2004).

A hipótese deste estudo é que a precisão dos sensores eletrônicos de umidade do solo varia conforme as características intrínsecas das diferentes classes de solo. O objetivo é avaliar e calibrar os sensores utilizando a metodologia gravimétrica, ajustando as medições para refletir adequadamente as características dos diferentes solos e otimizar a precisão das medições de umidade.

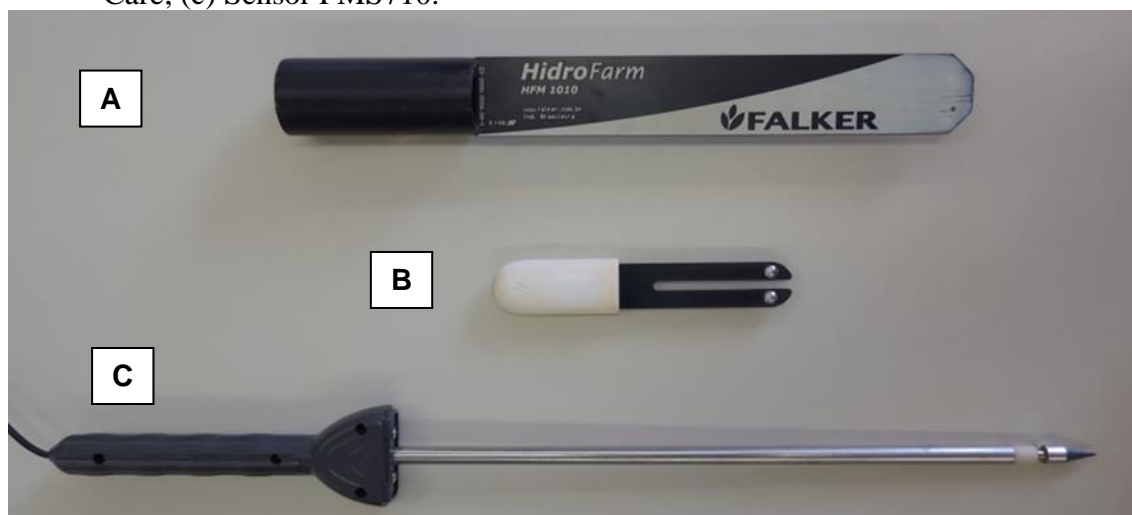
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e contexto experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pesquisas do Instituto de

Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (ICA/UFVJM), localizado em Unaí – MG. Foram utilizados no estudo os sensores HidroFarm, Vergtrug Care e PMS710 (Figura 1) e quatro classes de solo, classificados de segundo Santos *et al.* (2018) como: Latossolo Vermelho Distrófico típico com horizonte A moderado, textura muito argilosa, caulínítico (LVd1); Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico, horizonte A moderado, textura muito argiloso caulínítico (LAd); Nitossolo Vermelho Distrófico típico, horizonte A proeminente, textura argilosa, caulínítico (NVd); e Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura argilosa, caulínítico (CXbe2). Os solos da área de estudo têm como material de origem, predominantemente, siltitos e argilitos da Formação Paraopeba, além de quartzoarenitos, filitos e siltitos da Formação Paranoá, ambos integrantes do Grupo Bambuí.

Figura 1. Sensores de umidade do solo utilizados. (a) Sensor HidroFarm; (b) Sensor Vergtrug Care; (c) Sensor PMS710.



Fonte: Autores (2023)

As amostras de solo foram coletadas na Fazenda Experimental Santa Paula (FESP), pertencente ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (ICA/UFVJM),

localizado no município de Unaí-MG, com latitude S 16°26'11.5" e longitude W46°53'55.4"W, a uma altitude média de 622 m e em relevo plano. A região faz parte do bioma cerrado e o clima local, segundo a

classificação de Köppen, é do tipo Aw – tropical com estação seca de inverno. A temperatura média anual é de 23,5 °C, e a pluviosidade média é de 1275 mm.

4.2. Descrição da amostragem e metodologia

As classes de solo na topossequência são: Latossolo Vermelho distrófico (LVd1), que predomina no topo; o Latossolo Amarelo distrófico (LAd), que ocupa a posição do ombro; o Nitossolo Vermelho distrófico (NVd), que ocorre na meia encosta/sopé e o Cambissolo Háptico

eutrófico (CXbe2), que se localiza no sopé, com uma extensão de 844 metros e variação altimétrica de 19 metros.

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 N como agente dispersante, conforme as recomendações da EMBRAPA (2017). A densidade do solo e a densidade de partículas foram determinadas seguindo os métodos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017). Todas as análises foram conduzidas no Laboratório de Solos do ICA/UFVJM, Campus Unaí, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios de densidade do solo (g cm^{-3}), densidade de partículas (g cm^{-3}), volume total de poros (%) e granulometria para as diferentes das classes de solo.

Variável	LVd1	LAd	NVd	CXbe2
	Profundidades de 0 - 20			
Ds (g cm^{-3})	1,26	1,20	1,22	1,32
DP (g cm^{-3})	2,60	2,61	2,72	2,59
VTP (%)	48,46	45,97	44,85	50,96
Argila (%)	66	69	46	43
Silte (%)	22	23	35	36
Areia (%)	12	8	19	21

LVd1: Latossolo Vermelho Distrófico típico com horizonte A moderado, textura muito argilosa, caulínico; LAd: Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico, horizonte A moderado, textura muito argiloso caulínico; NVd: Nitossolo Vermelho Distrófico típico, horizonte A proeminente, textura argilosa, caulínico; CXbe2: Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura argilosa, caulínico.

Fonte: Autores (2023)

Foram coletadas três amostras indeformadas por classe de solo, utilizando cilindros de PVC com 200 mm de altura e 112 mm de diâmetro interno, representando a camada de 0 - 200 mm de profundidade. As três amostras foram consideradas como repetições experimentais para cada classe de solo. Após a coleta as amostras foram devidamente acondicionadas para transporte e encaminhadas para o Laboratório de Pesquisas do ICA/UFVJM. Em laboratório, com o intuito de garantir que a massa de material de solo estivesse contida apenas no interior dos cilindros, o excedente de material foi removido. Após o preparo as amostras foram submetidas individualmente

à saturação lenta por capilaridade com água destilada.

4.3 Procedimentos experimentais e análise estatística

Após a saturação, as amostras foram pesadas e os sensores foram inseridos e mantidos imersos durante todo o período de avaliação. A face inferior das amostras foi apoiada sobre uma coluna de areia para garantir uma secagem homogêneo. As amostras correspondentes às três repetições de cada classe de solo, foram mantidas em ambiente laboratorial com temperatura controlada a 25 °C. As leituras de umidade

foram realizadas diariamente durante 7 dias, sempre nos mesmos horários, em três momentos do dia às 8 horas, 12 horas e 18 horas. Simultaneamente à aquisição dos

dados de umidade nos instrumentos, as colunas de solo foram pesadas para determinação da umidade gravimétrica, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2. Amostra indeformada, em processo de pesagem após leituras dos sensores.



Fonte: Autores (2023)

A umidade gravimétrica foi obtida de acordo com a equação

$$\mu = 100 \times (Mu - Ms / Ms) \quad (1)$$

Em que: μ – umidade com base em massa, %; Mu – massa de água, gramas; Ms – massa do solo seco, gramas; 100 – fator de conversão para porcentagem.

A densidade do solo (Ds) foi calculada ao final das avaliações dividindo-se a massa de solo seco pelo volume total de solo no cilindro volumétrico após secagem das amostras em estufa a 105°C por 24 horas. Assim, usando a umidade gravimétrica, foi possível calcular a umidade volumétrica através da equação: $\theta = \mu * Ds$. As curvas de

correlação entre as leituras do sensor e as umidades volumétricas reais determinadas pela razão área-massa-volume foram ajustadas com análise estatística realizada no programa Matlab (The MathWorks, MA, USA) versão R2015.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que possibilitaram a calibração dos sensores para os diferentes tipos de solo são apresentados a seguir. A Tabela 2 detalha as características físico-hídricas das colunas de calibração para os solos do tipo LVd1, LAd, NVd e CXbe2.

Tabela 2. Valores médios de densidade do solo (g cm^{-3}), umidade gravimétrica (g g^{-1}) e umidade volumétrica (g cm^{-3}) das colunas de solo utilizadas para a calibração em diferentes classes de solo.

Solo	Densidade (g cm^{-3})	Umidade gravimétrica (g g^{-1})	Umidade volumétrica (g cm^{-3})
LVd1	1,26	39,2	49,4
LAd	1,20	41,7	50,0
NVd	1,22	39,3	47,9
CXbe2	1,32	34,4	45,4

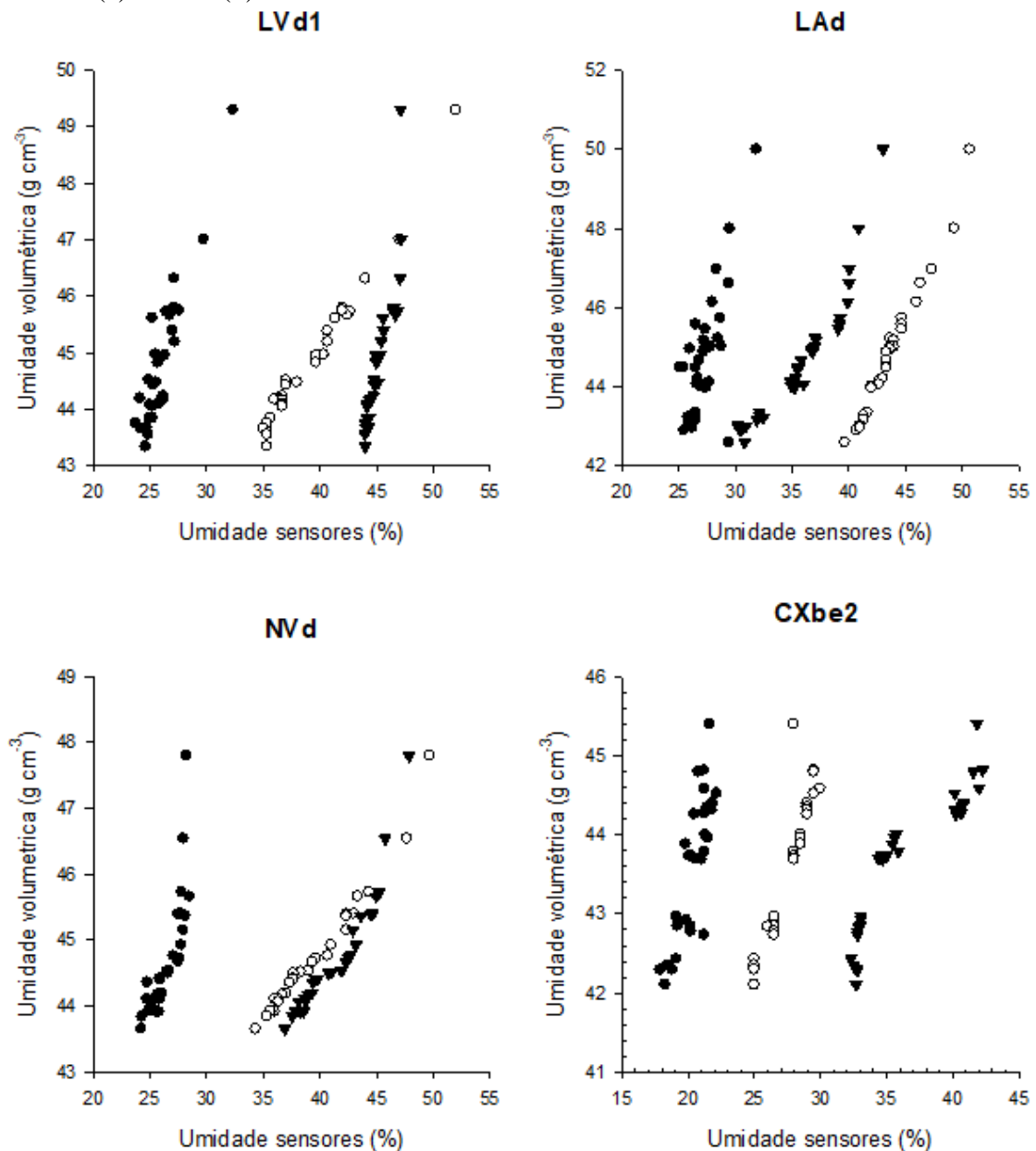
LVd1 = Latossolo Vermelho Distrófico típico com horizonte A moderado, textura muito argilosa, caulínico; LAd = Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico, horizonte A moderado, textura muito argilosa caulínico; NVd = Nitossolo Vermelho Distrófico típico, horizonte A proeminente, textura argilosa, caulínico; CXbe2 = Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura argilosa, caulínico.

Fonte: Autores (2023)

O conteúdo volumétrico de água medido pelos sensores HidroFarm, Vergrug Care e PMS710 para os solos das classes LVd1, LAd, NVd e CXbe2 está apresentado

na Figura 3, permitindo uma comparação direta com os valores de umidade volumétrica aferidos.

Figura 3. Conteúdo volumétrico de água aferido por diferentes sensores. (a) LVD1; (b) LAd; (c) NVd e (d) CXbe2.



Fonte: Autores (2023)

A análise dos diferentes sensores para um mesmo tipo de solo revela uma baixa concordância entre os sensores, indicando que é recomendável utilizar um único modelo para garantir maior precisão. De acordo, Nagahage, Nagahage e Fujino (2019), o desempenho dos sensores de umidade do solo depende diretamente das características do solo analisado. Essa perspectiva ajuda a explicar a variabilidade

dos sensores para cada tipo de solo analisado neste trabalho, principalmente a identificada em LVD1 e LAd.

O estudo de Gava, Silva e Baio (2016) reforça que sensores capacitivos subestima a umidade real em aproximadamente 8% em solos argilosos, especialmente nas medições próximas a capacidade de campo. Em solos arenosos, devido a drenagem mais rápida, a

subestimação da umidade real pelo sensor capacitivo é cerca de 4%.

Os resultados mostraram que os sensores Vergrug Care e PMS710 apresentaram um desempenho satisfatório na estimativa da umidade volumétrica, especialmente em solos como Latossolos Vermelho e Amarelo, Nitossolo Vermelho e Cambissolo Háplico, desde que devidamente calibrados para cada classe de solo, conforme mostra a Tabela 3. Essa calibração ajustada é fundamental, considerando que as variações texturais entre os solos, como os teores de argila, silte e areia, de acordo com a Tabela 1, afetam diretamente a retenção e o movimento da água no solo, influenciando as leituras dos sensores. Em contrapartida, o sensor HydroFarm demonstrou um desempenho inferior, sugerindo uma menor capacidade de adaptação a solos com grandes variações texturais, o que evidencia a importância de uma calibração precisa para garantir a

confiabilidade das medições, conforme mostra a Tabela 3. Estudos indicam que calibrações específicas são essenciais para compensar variações texturais, garantindo leituras confiáveis, especialmente em solos argilosos ou arenosos, onde a capacidade de retenção de água difere significativamente (Feng; Sui, 2020; Lim; Herrera; Cruz, 2024).

Estudos anteriores destacam a importância da calibração específica dos sensores, considerando as propriedades físicas e químicas de cada tipo de solo, como a textura e a capacidade de retenção de água, que influenciam diretamente a precisão das medições (Babangida *et al.*, 2014; Zanetti *et al.*, 2015). Esse ajuste é fundamental não apenas para garantir medições consistentes, mas também para otimizar o desempenho das tecnologias de monitoramento de umidade em diversos contextos agrícolas (Kashyap, Kumar, 2021; Hodges; Tagert; Paz, 2022).

Tabela 3. Medidas de desempenho da calibração estática dos sensores de umidade em diferentes solos deve ter fonte 12, largura de 10 ou 15 cm, primeira linha em negrito, se necessário dividir em duas tabelas, ou inverter linha com coluna

Sensor	Tipo de solo	Curva de calibração	R²	RMSE	P-valor	Pearson	Kendall
HidroFarm	LVd1	$y = 0.015x^2 - 0.14x + 39$	0.85	0.492	0,08	0,32	0,59
Vergtrug Care	LVd1	$y = -0.0021x^3 + 0.28x^2 - 12.04x + 210.4$	0.92	0.36	0,00	0,90	0,82
PMS710	LVd1	$y = 0.07x^2 - 5.3x + 143$	0.81	0.55	0,00	0,90	0,89
HidroFarm	LAd	$y = 0.1039x^2 - 5.29x + 104.4$	0.57	1.05	0.00	0.72	0.48
Vergtrug Care	LAd	$y = 0.6538x + 16.3$	0.98	0.22	0.00	0.99	0.96
PMS710	LAd	$y = 0.004329x^3 - 0.435x^2 + 14.84x - 127.9$	0.97	0.29	0.30	0.18	0.86
HidroFarm	NVd	$y = 0.06012x^3 - 4.567x^2 + 115.8x -$	0.72	0.52	0.00	0.79	0.80
Vergtrug Care	NVd	$y = 0.001135x^3 - 0.1352x^2 + 5.551x - 33.54$	0.99	0.09	0.00	0.98	0.97
PMS710	NVd	$y = 0.004837x^3 - 0.5825x^2 + 23.55x - 275.2$	0.98	0.14	0.00	0.94	0.97
HidroFarm	CXbe2	$y = -0.01003x^2 + 1.039x + 26.61$	0.68	0.53	0.00	0.82	0.62
Vergtrug Care	CXbe2	$y = -0.001492x^2 + 0.6069x + 28$	0.87	0.34	0.00	0.93	0.85
PMS710	CXbe2	$y = 0.009451x^3 - 1.078x^2 + 41x - 476.3$	0.95	0.22	0.00	0.92	0.88

LVd1 = Latossolo Vermelho Distrófico típico com horizonte A moderado, textura muito argilosa, caulínítico; LAd = Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico, horizonte A moderado, textura muito argiloso caulínítico; NVd = Nitossolo Vermelho Distrófico típico, horizonte A proeminente, textura argilosa, caulínítico; CXbe2 = Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura argilosa, caulínítico.

Fonte: Autores (2023)

Sena *et al.* (2020) destacam que a calibração de sensores de umidade do solo deve ser personalizada tanto para o tipo de solo quanto para suas diferentes camadas, uma vez que o manejo pode alterar a densidade do solo, induzindo a leituras imprecisas, mesmo com curvas de calibração específicas para o tipo de solo em estudo.

Os sensores HidroFarm e PMS710 não apresentaram resultados estatisticamente significativos, com $P = 0,08$

para LVd1 e $P = 0,30$ para o solo LAd, valores superiores ao nível de significância adotado ($P < 0,05$). No entanto, o coeficiente de correlação de Kendall, revelou que todos os tratamentos, envolvendo sensores e solos, apresentaram correlações significativamente diferentes de zero, com destaque para o sensor HidroFarm, que exibiu os menores valores de correlação em todos os solos analisados.

As curvas de calibração para os sensores apresentaram coeficientes de

determinação variando de 0,57 e 0,99. O coeficiente de determinação (R^2) indica a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo, sendo que valores

próximos de 1,0 indicam um melhor ajuste do modelo, o que reflete maior precisão e exatidão dos sensores.

6 CONCLUSÃO

A utilização dos sensores de umidade de solo para estimativa do teor de água em solos agrícolas demonstrou benefícios significativos na precisão das medições. O desempenho das curvas de calibração revelou que, com exceção do sensor HydroFarm, os sensores Vergtrug Care e PMS710 foram eficazes para a estimativa de umidade volumétrica em Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Amarelo Distrófico, Nitossolo Vermelho Distrófico e Cambissolo Háplico, desde que calibrados conforme as características específicas de cada tipo de solo. Calibrações precisas foram essenciais para garantir medições exatas da umidade do solo, evidenciando a necessidade de ajustes conforme as condições específicas de cada solo.

7 REFERÊNCIAS

BABANGIDA, N. M.; ASKARI, M.; YUSOF, K. W.; MUHAMMAD, R. U. M. Comparison of soil water retention functions for humid tropical soils. **Applied Mechanics and Materials**, Zürich, v. 567, p. 8-13, 2014.

CÁSSARO, F. A. M.; OLIVEIRA, J. A. T.; CRUZ, H.; PIRES, L. F. Utilização de um sensor de umidade para o Arduino na determinação da curva característica de retenção de água por um sistema poroso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 42, p. e20190130, 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

FENG, G.; SUI, R. Evaluation and calibration of soil moisture sensors in undisturbed soils. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 63, n. 2, p. 265-274, 2020.

GAVA, R.; SILVA, E. E.; BAILO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2016.

HODGES, B.; TAGERT, M. L.; PAZ, J. O. Use of a crop model and soil moisture sensors for estimating soil moisture and irrigation applications in a production soybean field. **Irrigation Science**, New York, v. 40, n. 6, p. 925-939, 2022.

KASHYAP, B.; KUMAR, R. Sensing methodologies in agriculture for soil moisture and nutrient monitoring. **IEEE Access**, Piscataway, v. 9, p. 14095-14121, 2021.

KRUEGER, E. S.; OCHSNER, T. E.; QUIRING, S. M. Development and evaluation of soil moisture-based indices for agricultural drought monitoring. **Agronomy Journal**, Basel, v. 111, n. 3, p. 1392-1406, 2019.

LIM, G. R.; HERRERA, S. X. O.; CRUZ, F. R. G. Selection of Suitable Soil Moisture Sensor for Clay Soil. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL AND INTELLIGENT SYSTEMS (I2CACIS), Shah Alam, 2024. **Proceedings [...]**. Shah Alam: IEEE, 2024. p. 308-313.

MAJHI, T.; SARKAR, N. Study on soil moisture variations in responding to

Tensiometer and soil moisture meter with respect to gravimetric method.

International Journal of Chemical Studies, New Delhi, v. 7, n. 4, p. 3179-3188, 2019.

MIRANDA, F. R.; SANTANA, M. G. S.; SOUZA, C. C. M.; OLIVEIRA, C. H. C. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2007.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, Basel, v. 9 n. 7, p. 141-151, 2019.

PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; PACHECO, F. E. D.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 458-468, 2017.

RO TIMI OJO, E.; BULLOCK, P. R.; FITZMAURICE, J. Field performance of five soil moisture instruments in heavy clay soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 79, n. 1, p. 20-29, 2015.

SANTOS NETO, S. M.; ANTONINO, A. C. D.; COUTINHO, A. P.; BARROS, C. A. A.; SOARES, W. A. Performance e calibração de um sensor tipo TDR em solos do estado de Pernambuco, Brasil. **Revista Aídis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**: Investigación, desarrollo y práctica, Coyoacán, v. 13, n. 1, p. 33-476, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. D.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SENA, C. C. R. S.; ALVES JUNIOR, J.; DOMINGOS, M. V. H.; ANTUNES JUNIOR, E. J.; BATTISTI, R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6 n. 4, p. 17228-17240, 2020.

SHARMA, P. K.; KUMAR, D.; SRIVASTAVA, H. S.; PATEL, P. Assessment of different methods for soil moisture estimation: A review. **Journal of Remote Sensing & GIS**, Noida, v. 9, n. 1, p. 57-73, 2018.

SINGH, A. K.; BHARDWAJ, A. K.; VERMA, C. L.; MISHRA, V. K.; SINGH, A. K.; ARORA, S.; SHARMA, N.; OJHA, R. P. Soil Moisture Sensing Techniques for Scheduling Irrigation. **Journal of Soil Salinity and Water Quality**, New Delhi, v. 11 n. 1, p. 68-76, 2019.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. Pedotransfer functions for tropical soils. **Developments in Soil Science**, Aberdeen, v. 30, p. 415-429, 2004.

ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, V. H.; ALVES, E. G. General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks. **Journal of Hydrology**, Sacramento, v. 530, p. 657-666, 2015.